

Sujet thèse / PhD subject 2025

Titre Thèse	Fonte et convection thermique dans le permafrost : comprendre le dégel pour mieux stocker l'énergie	
PhD Title	Melting and Thermal Convection in Permafrost: Understanding Thawing for Better Energy Storage	
(Co)-Directeur	Farzam Zoueshtiagh	E-mail : farzam.zoueshtiagh@univ-lille.fr
(Co)-Directeur	Silvia Hirata Da Costa	E-mail : silvia.hirata@univ-lille.fr
(Co)-Encadrant (s)	Alexis Duchesne	E-mail : alexis.duchesne@univ-lille.fr
(Co)-Encadrant (s)	Enrico Calzavarini	E-mail : enrico.calzavarini@univ-lille.fr
Laboratoire	IEMN	Web : https://www.iemn.fr/
Groupe(s)	AIMAN - FILMS	Web : https://films.univ-lille.fr/
Projet phare principal	ENERGY	
Demande de fléchage IEMN ?	Non	
Demande de labellisation Université de Lille (GREAL, labellisée)	Oui - Label : labélisée Université de Lille	
Financement acquis Oui ☐ Non X Partiel ☐		
Financement demandé	Contrat Doctoral Etablissement Région ou Autre ☐ Préciser :	ULille X Centrale Lille ☐ JUNIA ☐ Co financement (Préciser l'origine, demande en cours, et si acquis ou pas) :

Résumé en français :

Le pergélisol, ou permafrost, désigne un sol gelé en continu pendant au moins deux années consécutives. Il couvre environ un quart des terres émergées de l'hémisphère nord et subit actuellement des transformations profondes sous l'effet du réchauffement climatique. Son dégel progressif constitue une menace environnementale majeure, car il pourrait libérer d'importantes quantités de gaz à effet de serre, le pergélisol renfermant environ deux fois plus de carbone que l'atmosphère actuelle [1]. La quantité de CO₂ piégée est estimée à quatre fois celle émise par les activités humaines depuis le XIXe siècle, justifiant son appellation de « bombe à retardement » climatique.

Dans ces régions, une couche active dégèle chaque été avant de regeler en hiver. Ce cycle thermique est un facteur clé dans l'évolution du pergélisol et est généralement étudié à travers des modèles simplifiés, tandis que les observations directes restent rares et fragmentaires [2]. La plupart des modèles climatiques considèrent principalement la conduction thermique verticale [3-5], mais un facteur souvent sous-estimé pourrait accélérer le dégel : la convection thermique dans la couche active, en particulier lorsque celle-ci est perméable [6]. En effet, en raison des propriétés thermodynamiques de l'eau, la convection peut se déclencher lorsque la température est comprise entre 0 °C et 4 °C, influençant significativement la dynamique du dégel.

L'objectif de cette thèse est d'étudier ces mécanismes de convection thermique et leur impact sur le dégel du pergélisol, via une approche combinant expériences en laboratoire, simulations numériques avancées et modélisations théoriques. Parallèlement, une meilleure compréhension de ces phénomènes pourrait ouvrir la voie à des solutions innovantes pour le stockage d'énergie thermique. En effet, les matériaux à changement de phase (MPC) offrent un moyen efficace de contrôler les transferts de chaleur, en exploitant les transitions solide-liquide pour stocker et restituer de l'énergie. En s'inspirant des mécanismes de convection naturelle dans les milieux poreux, cette recherche pourrait permettre d'optimiser le choix et l'agencement de ces matériaux pour une gestion thermique plus efficace dans les systèmes énergétiques.

Ce projet s'inscrit ainsi dans une double perspective : d'une part, il vise à améliorer la compréhension des processus de fonte du pergélisol et leur rôle dans l'accélération du changement climatique ; d'autre part, il ambitionne d'exploiter ces connaissances pour développer des solutions de stockage thermique

innovantes basées sur un contrôle optimisé des transferts thermiques par des matériaux à changement de phase.

Cette thèse s'articulera autour de trois approches complémentaires – expérimentale, théorique et numérique – permettant de combiner des expertises reconnues. L'expérimentation sera menée au sein de l'équipe FILMS de l'IEMN, spécialisée dans la mise en place de dispositifs expérimentaux avancés, tandis que les volets théorique et numérique seront développés en collaboration avec l'Unité de Mécanique de Lille (UML), experte en modélisation et simulation des phénomènes physiques. La doctorante ou le doctorant bénéficiera ainsi d'un encadrement pluridisciplinaire, nécessitant un goût marqué pour le travail en équipe, l'initiative et l'autonomie. Pour la partie expérimentale, l'accès aux infrastructures de l'IEMN, incluant 1600 m² de salle blanche, permettra la fabrication de structures à porosité contrôlée et l'utilisation de bancs dédiés à la visualisation et au suivi de l'interface solide-liquide lors de la fusion de la glace. Enfin, des collaborations internationales avec l'Université de Floride (Gainesville, USA) et l'Université Fédérale Fluminense (Brésil) sont envisagées.

Abstract :

Permafrost refers to soil that remains continuously frozen for at least two consecutive years. It covers approximately one-quarter of the land surface in the Northern Hemisphere and is currently undergoing significant transformations due to climate change. Its gradual thawing poses a major environmental threat, as it could release substantial amounts of greenhouse gases, with permafrost containing about twice as much carbon as the current atmosphere [1]. The amount of trapped CO₂ is estimated to be four times greater than that emitted by human activities since the 19th century, justifying its characterization as a climate "ticking time bomb."

In these regions, an active layer thaws each summer before refreezing in winter. This thermal cycle is a key factor in permafrost evolution and is generally studied using simplified models, while direct observations remain scarce and fragmented [2]. Most climate models primarily consider vertical heat conduction [3-5], but an often underestimated factor could accelerate thawing: thermal convection in the active layer, particularly when it is highly permeable [6]. Due to the thermodynamic properties of water, convection can occur when the temperature ranges between 0°C and 4°C, significantly influencing the thawing dynamics.

This PhD project aims to study these thermal convection mechanisms and their impact on permafrost thawing through a combined approach involving laboratory experiments, advanced numerical simulations, and theoretical modeling. Additionally, a better understanding of these phenomena could lead to innovative thermal energy storage solutions. Phase change materials (PCM) offer an efficient way to control heat transfer by utilizing solid-liquid transitions to store and release energy. By drawing inspiration from natural convection mechanisms in porous media, this research could optimize the selection and arrangement of these materials for more efficient thermal management in energy systems. Thus, this project has a dual objective: first, to enhance the understanding of permafrost melting processes and their role in accelerating climate change; and second, to leverage this knowledge to develop innovative thermal storage solutions based on optimized heat transfer control using phase change materials.

The PhD research will follow three complementary approaches—experimental, theoretical, and numerical—bringing together recognized expertise in these domains. Experimental work will be conducted within the FILMS team at IEMN, which specializes in developing advanced experimental setups, while theoretical and numerical studies will be carried out in collaboration with the Unité de Mécanique de Lille (UML), an expert in modeling and simulating physical phenomena. The PhD candidate will thus benefit from a multidisciplinary supervision, requiring a strong aptitude for teamwork, initiative, and autonomy.

For the experimental component, access to IEMN's facilities, including 1,600 m² of cleanroom space, will allow the fabrication of structures with controlled porosity and the use of dedicated setups for visualizing and monitoring the solid-liquid interface during ice melting. Finally, international collaborations are planned with the University of Florida (Gainesville, USA) and the Universidade Federal Fluminense (Brazil).

Références/References.

- [1] CNRS <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-permafrost-des-sols-de-larctique-aux-modeles-climatiques>
- [2] J. Obu, S. Westermann, A. Bartsch, N. Berdnikov, H. H. Christiansen, A. Dashtseren, R. Delaloye, B. Elberling, B. Etzelmüller, A. Kholodov, Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale, *Earth-Science Rev.* 193, 299 (2019).
- [3] R. Dankers, E. J. Burke, and J. Price, Simulation of permafrost and seasonal thaw depth in the JULES land surface scheme, *Cryosphere* 5, 773 (2011).
- [4] M. Guimberteau, D. Zhu, F. Maignan, Y. Huang, C. Yue, S. Dantec-Nédélec, C. Ottlé, A. Jornet-Puig, A. Bastos, P. Laurent, ORCHIDEE-MICT (v8. 4.1), a land surface model for the high latitudes: Model description and validation, *Geosci. Model Dev.* 11, 121 (2018).
- [5] C. G. Andresen, D. M. Lawrence, C. J. Wilson, A. D. McGuire, C. Koven, K. Schaefer, E. Jafarov, S. Peng, X. Chen, I. Gouttevin, Soil moisture and hydrology projections of the permafrost region—A model intercomparison, *Cryosphere* 14, 445 (2020).
- [6] M. Magnani, S. Musacchio, A. Provenzale, G. Boffetta, Convection in the active layer speeds up permafrost thaw in coarse-grained soils, *Phys. Rev. Fluids* 9, L081501 (2024).